

文章编号: 0258-7025(2009)10-2745-06

用有限元法讨论光抽运垂直外腔面发射半导体激光器的散热性能

陈柏众^{1,2} 戴特力^{1,2} 梁一平^{1,2} 秦莉³ 赵红⁴ 周勇⁴ 程立文⁵

¹ 重庆师范大学重庆市高校光学工程重点实验室, 重庆 400047; ² 重庆师范大学物理学与信息技术学院, 重庆 400047
³ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022
⁴ 中国电子科技集团公司第 44 研究所, 重庆 400060; ⁵ 蓝雨软件公司, 上海 200033

摘要 多物理场耦合有限元方法被用来模拟光抽运垂直外腔面发射半导体激光器(OPS-VECSEL)内部的热分布情况, 特别对 OPS-VECSEL 芯片帽层表面与金刚石散热片毛细键合(capillary bond)的情况做了计算。计算表明, 在没有金刚石散热片的情况下, 从窗口以下首个量子阱到末个量子阱的温差达到 150 K; 在有金刚石散热片的情况下, 器件中各个量子阱的温差很小, 其共振波长差只有几纳米; 在芯片的分布式布拉格反射镜(DBR)一侧焊接有硅微通道冷却器的情况下, 各量子阱间的温差进一步减小, 器件性能得到最大改善。模拟计算也表明, 在抽运功率不变的情况下, 适当增加抽运光的半径, 可显著降低器件的热效应, 尤其热透镜效应。

关键词 激光器; 多物理场有限元法; 半导体激光器; 金刚石片; 硅微通道冷却器; 热管理

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093610.2745

Finite Element Analysis of Thermal Management in Optical Pumping Semiconductor Vertical-External Cavity Surface-Emitting Laser

Chen Baizhong^{1,2} Dai Teli^{1,2} Liang Yiping^{1,2} Qin Li³ Zhao Hong⁴
Zhou Yong⁴ Cheng Liwen⁵

¹ Chongqing High-Academy Key Laboratory of Optical Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China
² College of Physics and Information Technology, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China
³ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jiling 130022, China
⁴ China Electronic Technology Corporation No. 44 Research Institute, Chongqing 400060, China
⁵ Blue Rain Software Company, Shanghai 200033, China

Abstract Multiphysics finite element analysis was used to simulate the heat distribution in a optical pumping semiconductor vertical-external-cavity surface-emitting laser (OPS-VECSEL). Specially, the VECSEL with a plate of transparent diamond that capillary bond to on cap layer of chip was calculated. Calculation indicate that when there is no diamond piece, the temperature difference between first and the last quantum well is about 150 K. But when the cooler is present, the temperature difference between them is very small as well as the resonale wavelength difference. In addition to diamond piece, a silicon microchannel cooler soldered onto DBR side of chip ulteriorly decreases the temperature difference between quantum wells and optimizes character of the chip. Simulating calculation also shows that properly increasing the diameter of pumping optical speckle was obviously able to lower the thermal effect, specially the heat lens effect.

Key words lasers; multiphysics finite element analysis; semiconductor laser; diamond piece; silicon microchannel cooler; thermal management

收稿日期: 2008-11-05; **收到修改稿日期**: 2009-02-16

基金项目: 重庆市高校光学工程重点实验室重点项目(0705)资助课题。

作者简介: 陈柏众(1980—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体激光器件及其应用等方面的研究。

E-mail: chenbaizhong5945@yahoo.cn

导师简介: 戴特力(1940—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事半导体激光器件及其应用、激光二极管抽运固体激光器、物质与强激光的相互作用等方面的研究。E-mail: telidai@yahoo.com.cn

1 引 言

近几年来,一种半导体前沿技术发展的新成果,光抽运垂直外腔面发射半导体激光器(Optics pumping semiconductor vertical external cavity surface emitting laser, OPS-VECSEL)已引起许多发达国家的重视。在一些具有国际水平的实验室,该器件的理论和实验均取得了令人瞩目的进展。这种激光器是20世纪90年代末期发展起来的新技术,兼顾了激光器二极管抽运固体激光器(DPL)和电抽运垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)的优点,是半导体激光技术中的新型器件。它以较高的功率密度、紧凑的几何结构和良好的光束质量,受到了激光产业界的关注,在光传输、生物技术、激光雷达、固体激光抽运、高速印刷以及高清显示等方面具有广泛的应用价值^[1]。本文主要在器件的热效应方面对 OPS-VECSEL 运行机制进行分析。

2 热管理

热效应的问题一直伴随着激光器的诞生与发展。激光二极管工作寿命依赖于激光器的工作温度及封装热阻,约束激光二极管抽运固体激光器性能的主要因素是热透镜效应。对光抽运垂直外腔面发射半导体激光器而言,耗散热主要集中在抽运光斑的范围。因为抽运光的阈值功率密度达到万瓦每平方厘米的水平,在这样大的功率密度的光辐射下,器件温度的上升会使有源层和分布布拉格反射镜(DBR)材料参数发生变化,设计结构失效,有效增益降低,最终使输出功率减小甚至为零。

导致这种增益降低主要有两个因素:1)随着温度的升高,单个量子阱的增益降低。2)典型的周期谐振增益(RPG)结构要求各层量子阱的位置与谐振腔内激光驻波的波腹重合。与边发射激光器相比,OPS-VECSEL有源区长度很短(只有几个微米),实现激光的一个必要条件是谐振腔的纵模波长、量子阱增益峰值波长与布拉格反射镜反射谱中心波长要相匹配^[2,3]。随着环境温度升高,或者由于工作时间长而引起这三部分材料的温度升高,致使这3个波长红移,而偏移的速率却不同步,其结果使 OPS-VECSEL 器件输出阈值特性对热沉温度变化非常敏感。

OPS-VECSEL 芯片运行时耗散热来自4个不同区域:帽层与窗口层的复合层、多量子阱激活区、DBR和衬底。多量子阱激活区中载流子的辐射复

合和非辐射复合的量子缺是主要的热源。DBR,帽层以及衬底层中热源是焦耳热。

前期器件耗散热是依次通过 DBR 和衬底传递到热沉上的。在 OPS-VECSEL 中使用的半导体 DBR 要求对量子阱工作波长的反射率高达 99.5%^[4,5]。DBR 是由足够多对 $\lambda/4$ 的 AlAs/GaAlAs 周期结构来实现的。此外,在这些周期性半导体薄层中也必须实现在工作波长上较低的光吸收,尤其当抽运光从 DBR 反射入 RPG 时对抽运光具有较低的光吸收。然而,较大的折射率差会有较高的能带不连续,这些较高的能带不连续导致较大的额外功率消耗。为了有效地减少衬底的热阻,用化学腐蚀的方法将衬底腐蚀掉。先用一定比例的 $H_2SO_4:H_2O:H_2O_2$ 混合溶液将衬底移除掉大部分,接着用一定比例的 $C_6H_8O_7:H_2O_2$ 的混合溶液腐蚀直到将衬底全部移除,露出腐蚀阻止面。腐蚀后的 OPS-VECSEL 器件的厚度小于 $10\ \mu m$ ^[6,7]。本文模拟中所选取的 OPS-VECSEL 器件都为移除掉衬底后的薄片设计。腐蚀后,把 OPS-VECSEL 薄片键合在高热导率的晶体上,形成另一个比 DBR 接触的热沉更有效的热扩散层。所选取的高热导率晶体要求对抽运光和谐振光透明。通常在金刚石片、蓝宝石片或碳化硅片3种材料中选用,其厚度在 $150\sim 300\ \mu m$ 之间。

3 有限元几何模型

文中器件尺寸为 $4\ mm\times 4\ mm$,移除掉衬底后器件厚度小于 $10\ \mu m$,其中 RPG 约为 $2\ \mu m$,DBR 约为 $5.5\ \mu m$,而帽层大约为 $0.1\ \mu m$,抽运光的半径 r 小于 $400\ \mu m$ 。显然器件的尺寸存在着较大的纵横比,是数值方法模拟的困难之处。我们采用多物理场耦合有

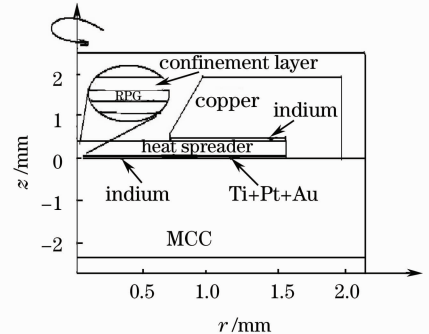


图1 OPS-VECSEL 模拟的基本几何图形
(采用2D轴对称几何模型)

Fig. 1 Basic geometry figure of OPS-VECSEL (using 2D axisymmetric geometry model)

限元法模拟软件(COMSOL Multiphysics)来计算。为了简化模型,保证计算的合理性,模拟的几何结构保留足够的细节,使用一个可以接受的相对简化的层结构。选取二维轴对称模型器件进行数值模拟,并且把各个相似层结构组合成复合层。其模拟几何直观图如图 1 所示。

图中被放大的元件结构包含 3 个复合层:分布布拉格反射镜,共振周期增益层和顶层,其上下还有热沉以及金属过渡层。顶层包括窗口限制层和帽层,增益层包括势阱层、势垒层和应变补偿层。DBR

层包含 20 多对高低折射率 $\lambda/4$ 层厚的交替结构。每个复合层的厚度是各个单层厚度之和,复合层的热传导率等效于一个各向异性的单层,水平与垂直方向的等效热阻是不同的。DBR 和有源层对抽运光的吸收系数如表 1。模拟的初边界条件,DBR 底部热沉和顶部的散热片的温度为设定的常数。 $r=0$ 处为器件的实际几何中心。模型的一系列边界条件设为轴对称条件,与其相对应的一系列边界温度为常数。

表 1 模拟中使用的材料参数

Table 1 Material parameters used in the simulation

Material	Diamond	Top layer	RPG	DBR	Titanium	Platinum	SiC	Sapphire	MCC	Copper	Indium	Solder
Thermal conductivity / (W/m·K)	2000	11	$k_r = 20$ $k_z = 11.8$	$k_r = 50.2$ $k_z = 44.8$	21.9	71.6	490	44	600	401	81.6	317
Density / (kg/m ³)	3515	4540	5226	4480	4510	21400	3210	3900	2330	8960	7310	19290
Thermal capacity / J/(kg·K)	520	390	337	394	520	130	690	600	710	380	230	128

4 物理模型的建立

热传导率是热传输中最重要的参数,OP-VECSEL 芯片的几个复合层往往由多个相同单元层构成。某一复合层中的单元层又由 2~3 种材料构成。等效复合层的参数可以定义为厚度为权重的平均值。由于外延片是层状结构,因此等效复合层沿着外延片的水平和垂直方向的热传导系数是不同的。用 k_z 表示复合层沿垂直方向的热传导系数,用 k_r 表示沿水平方向的热传导系数,则^[8]

$$k_r = \frac{\sum_{n=1}^N d(z, n) k_n}{\sum_{n=1}^N d(z, n)}, \quad (1)$$

$$k_z = \frac{\sum_{n=1}^N d(z, n)}{\sum_{n=1}^N d(z, n) / k_n}. \quad (2)$$

这里 $d_{z,n}$ 和 k_n 分别表示第 n 层量子阱的厚度和热传导系数, N 是总层数。而标准的 DBR 是厚度为 $\lambda/4$ 的高低折射率更替的半导体层状结构。由此 DBR 的热传导系数可以简单表示为^[9]

$$k_{r, \text{DBR}} = \frac{n_2 k_1 + n_1 k_2}{n_1 + n_2}, \quad (3)$$

$$k_{z, \text{DBR}} = \frac{n_2 + n_1}{n_1 / k_2 + n_2 / k_1}, \quad (4)$$

这里 n_1, n_2 分别为两层的折射率, k_1, k_2 分别为其相应的热传导系数。材料各个单层的热传导系数、密度以及常压热容及使用常数的计算结果如表 1 所示。用于热沉的硅微通道(MCC)是用光刻和微加工技术制备的冷却器。冷却液从微通道流过带走器件传到硅上的热量,可实现主动冷却。硅的热传导系数约为 130 W/(m·K),用其制作的硅微沟道的热阻为^[10,11]

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{h \cdot 400 \cdot S_{\text{McSide}}} + \frac{1}{h_{12} \cdot A} + R_{\text{In-Au-Si}} + R_L, \quad (5)$$

式中 S_{McSide} 是一个沟道截面积, $R_{\text{In-Au-Si}}$ 是钢金硅系列层的总热阻, h 为微通道边界层的模系数, R_L 为硅体的热阻。由此可求出其等效热传导系数为 600 W/(m·K)。

文中选取的器件的有源层,即多量子阱共振周期增益区采用 InGaAs-AlGaAs-GaAsP 系材料。该区由 15 个量子阱构成,每个量子阱由 10 nm 的窄带 InGaAs(势阱), 121.5 nm 的宽带 AlGaAs(势垒)和 14.5 nm 的应变补偿层 GaAsP 构成。抽运波长为 808 nm,工作波长约 980 nm。DBR 是在 GaAs 衬

底上生长 26.5 对 $\lambda/4$ 厚度的 AlGaAs/GaAs 交替结构形成的。对于所选择的工作波长反射率要求达到 99.5% 以上^[6,12,13]。在设计中,增加窗口层的目的是防止在势阱和势垒区中的载流子泄露,要求势垒足够大。另外窗口层必须是十分的薄,它的厚度使芯片形成的标准具厚度发生微调,进而影响共振吸收谱。当然,该厚度也影响热阻,因为从增益层到窗口层再到表面散热片是热流的主要途径。这里选取的窗口层是厚度约为 100 nm 的 AlGaAs。

在软件的 2D 轴对称模型中所用的初始热传导方程为^[14~16]

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = Q, \quad (6)$$

这里 Q 为热载荷密度分布, k 为材料的热传导系数。在抽运功率适度的情况下,热功率密度与势垒吸收抽运光的效率成比例,在这里假设自发发射再吸收生成的热忽略不计。用 $Q(r, z)$ 来表示高斯光束抽运光在垂直方向的指数衰减和径向 r 分布。抽运吸收

和由此产生的热负载假定主要产生于增益层和 DBR 层,光强按高斯径向分布的情况下的增益层热负载为^[9]

$$Q_r(r, z) = \frac{2\eta_r P_p \alpha_r}{\pi \omega_p^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right) \exp[-\alpha_r(Z_r - z)], \quad (7)$$

这里 r, z 是图 1 中的空间坐标, α_r 是增益层对抽运功率的吸收系数, η_r 是增益层抽运功率吸收转化成热的系数, ω_p 是抽运光斑半径, P_p 是到达增益层的抽运功率。DBR 上的热负载为^[9]

$$Q_d(r, z) = \frac{2\eta_d P_p \alpha_d}{\pi \omega_p^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right) \times \exp[-\alpha_d(Z_d - z)] \exp(\alpha_r h_d), \quad (8)$$

式中 α_d 是 DBR 上抽运功率转移成热的系数, η_d 是 DBR 上的有效抽运吸收系数, h_d 是增益层的厚度。当 $r \geq \omega_p$ 时,热负载为 0。模拟中公式各个参数的取值如表 2。

表 2 建模所取的参数

Table 2 Value of the modeling coefficients

Parameter	η_r	$\omega_p/\mu\text{m}$	$Z_r/\mu\text{m}$	α_r/mm^{-1}	P_p/W	α_d/mm^{-1}	η_d	$Z_d/\mu\text{m}$
Value	0.176	50	1.87	1109	10	1525	1	5.51

5 模拟结果及讨论

OPS-VECSEL 器件数值模拟的结果及器件的温度分布如图 2 所示。为了充分体现主要分布区的温度分布,主要突出器件中心向外 z 方向 ($-30 \sim 30 \mu\text{m}$), r 轴向外 $150 \mu\text{m}$ 区域的温度分布。有源区处在 z 轴中间位置,其上部散热片选择金刚石片,下部热沉选择硅微沟道,硅微沟道金属化后用钢焊在已经移除掉衬底的 OPS-VECSEL 器件下部 DBR 的底部。图中箭头为总热流分布及矢量方向,曲线为等温线。

从图 2 可以看出,上部的金刚石散热片的效果

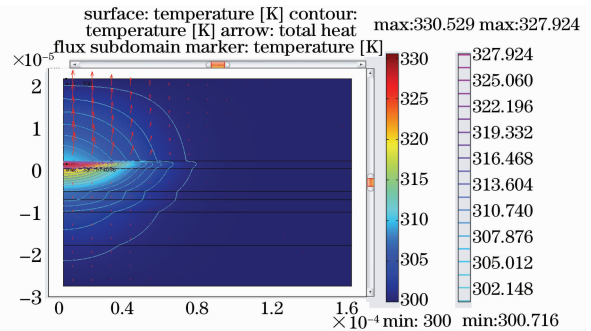


图 2 器件数值模拟的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of the simulation of OPS-VECSEL

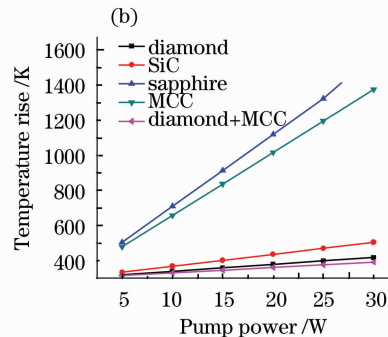
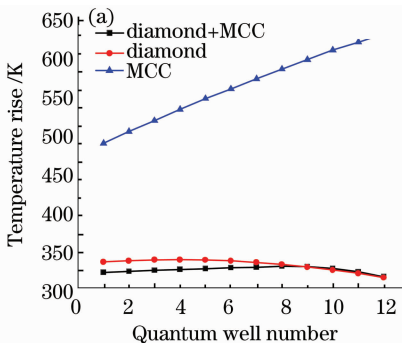


图 3 (a) 金刚石片对量子阱温升的影响; (b) 不同抽运功率对器件最高温升的影响

Fig. 3 (a) Temperature rise versus quantum well number; (b) temperature rise versus pump power

很好,而 DBR 的热阻较大使得器件有源层产生热量不能有效地从下面热沉取出来,使 RPG 中的量子阱的温度较高。实际上,半导体激光器热管理的最简单方法是将器件焊在热沉上,然而,这种方法在 OPS-VECSEL 上很难得到需要的效果。如图 3(a),在无金刚石散热片的情况下,从窗口以下第一个量子阱到最后一个量子阱的温差达到 150 K,以温度漂移系数为 $2.94 \text{ nm/K}^{[1]}$,计算 13 个量子阱共振波长差为 441 nm。这就意味着量子阱的参数严重不一致,谐振条件被破坏,输出功率下降乃至工作停止。图 3(a)也表明,有金刚石散热片冷却的器件中各个量子阱温差很小,此时,共振波长也只有几个纳米的差异。金刚石散热片与下部微通道热沉同时存在时,器件各量子阱间的温差进一步减小,器件性能得到最大的改善。

由于量子阱本身平均热传导系数低,大约为 $20 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,即使金刚石散热片的热传导效率很高,各个量子阱的温度分布依然不均匀。在无热沉的情况下图 3(a)中菱形点阵组成的曲线,温度最高的量子阱是从上至下第 9 个量子阱,此量子阱处于有源层的偏下部,各个量子阱的温差大约为 25 K。为了达到更好的效果,DBR 下面焊接的热沉便产生了有效的微调效果。在图 3(a)上的黑色点所组成的曲线,也即在热沉和金刚石散热片同时存在情况下各个量子阱的温度分布是最均匀的。此时,也可以假设上部金刚石散热片与下部热沉的边界温度是不同的,保持上表面温度为 300 K,而下部选择硅微通道用冷却液调节下边界温度。图 3(b)给出了用光学碳化硅片和光学蓝宝石片代替光学金刚石片键合在芯片表面的模拟计算结果,非常明显,碳化硅片的散热效果可以和使用金刚石片相比拟,虽然温升高一点,但价格却低得多,而蓝宝石片在大功率情况下不宜使用。

如图 4 所示,在降低硅微通道冷却液温度的情况下有源层的最高温升有一定的缩减。在微通道冷却液温度降到 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,有源层的最高温升由 $31 \text{ }^\circ\text{C}$ 降到 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,这是一个不小的优化。保证有源层的各个量子阱的最小温差对降低量子阱阈值增加输出功率起着决定性作用。图 3(b)中可以发现在上部热沉和下面的制冷器不同的情况下器件的最高温升也出现了较大的差异,在金刚石或碳化硅存在的情况下,即使没有下部的散热部分,器件的最高温升也表现得相当优越,由此可以看出对器件散热起决定性作用的是上部的高热传导系数的散热片,而不是

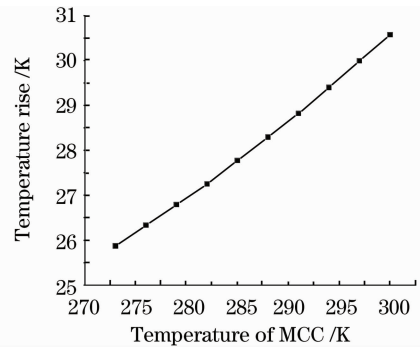


图 4 硅微通道内冷却液温度与有源层的温升关系

Fig. 4 RPG's temperature rise versus the cooling fluid temperature in the MCC

下部的热沉。

具有高热传导效率的金刚石散热片在 OPS-VECSEL 激光器热管理方面表现出非常优异的效果,能对器件散热并能使有源层的热分布均匀。散热片热传导系数的改变对器件最高温升的改变效果也是相当显著的。分析表明用硅微通道作热沉,明显地改变了温度在量子阱之间的分布均匀性。这说明硅微通道的热阻可以用冷却液调整,达到很低的数值^[17]。

实际上,对热效应的改变还有一种很简单的方法,即在抽运功率不变的情况下,适当增加抽运光的半径,可显著降低器件的热效应,尤其热透镜效应。在图 5(a)中分别对比金刚石、碳化硅、蓝宝石 3 种散热片的情况下,改变抽运光半径,以研究抽运光半径大小对有源层内部最高温升的影响。结果表明采用金刚石片在散热抽运半径为 $50 \mu\text{m}$ 的情况下,器件的最高温升也达到了 $1053 \text{ }^\circ\text{C}$ 。而增大抽运光束半径,最高温升显著下降。图 5(b)表示,散热片热传导系数在 $500 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 处有一个转折点。即使不用金刚石,用 $\text{SiC } 490 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 也可有效改善热管理的结果。

6 结 论

采用多物理场耦合有限元法模拟软件分析在不同散热结构、不同传热介质情况下,OPS-VECSEL 器件内部的温度分布特点。模拟结果表明在芯片表面没有金刚石散热片的情况下,从窗口以下第一个量子阱到最后一个量子阱的温差达到 150 K,13 个量子阱共振波长相差为 441 nm。可见,在芯片帽层键合一片高热导率的散热片对于 OPS-VECSEL 的输出特性起着决定性的作用。在采用金刚石散热片的基础上,让芯片的分布布拉格反射镜一侧焊接在

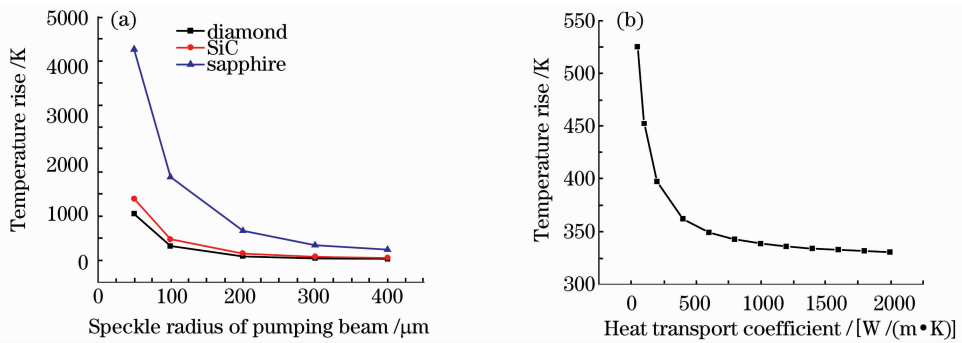


图 5 (a) 抽运半径与有源层温升的关系; (b) 散热片热传导系数与有源层温升的关系

Fig. 5 (a) RPG's temperature rise versus the speckle radius of pumping beam; (b) RPG's temperature rise versus the heat transport coefficient

铜热沉或硅微通道冷却器表面, 则各量子阱间的温差更小, 器件性能得到最大的优化。用碳化硅片代替金刚石片也可以得到较好的结果。在抽运功率不变的情况下, 适当增加抽运光的半径, 可显著降低器件的热效应。热效应是限制光抽运半导体垂直外腔面发射激光器输出功率和光束质量的关键因素。由于器件的体积相对较小, 有源层内部热功率密度较大, DBR 层导热率低, 热阻较大, 使器件的阈值、输出功率对热沉温度有强烈的依赖。本文用多物理场有限元分析法模拟计算了几种常用的 OPS-VECSEL 器件的散热几何结构和几种散热材料。其结论对设计和优化该器件的整体机构有参考价值。用同样的方法, 模拟计算其他运行波长、不同抽运、不同材料结构、更细致考虑热管理的边界条件等都是有待进行的工作。

参 考 文 献

- 1 He Chunfeng, Li Jun, Qin Li *et al.*. Spectral analysis of OPS-VECSEL[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **13**(3): 97~99
何春风, 李 军, 秦 莉等. 光抽运垂直外腔面发射激光器的光谱特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, **13**(3): 97~99
- 2 M. Fallahi, J. V. Moloney, L. Fan. High power vertical-external-cavity surface-emitting lasers and their applications[C]. *SPIE*, 2006, **6127**: 67~77
- 3 R. Haring, R. Paschotta, A. Aschwanen. High-power passively mode-locked semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9): 1268~1275
- 4 A. C. Tropper, S. Hoogland. Extended cavity surface-emitting semiconductor lasers[J]. *Prog. Quantum Electron.*, 2006, **30**(1): 1~43
- 5 S. Illek, T. Albrecht, P. Brick *et al.*. Vertical-external-cavity surface-emitting laser with monolithically integrated pump lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(24): 1952~1954
- 6 K. Kim, J. Yoo, G. Kim *et al.*. Enhancement of pumping efficiency in a vertical-external-cavity surface-emitting laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **12**(1): 19~23

- 7 Chen Baizhong, Dai Teli. Principle and application of OPS-VECSEL[J]. *Journal of Chongqing Normal University*, 2008, **25**(3): 62~65
陈柏众, 戴特力. 光泵浦半导体垂直外腔面发射激光器的原理与应用[J]. *重庆师范大学学报*, 2008, **25**(3): 62~65
- 8 H. Lindberg, M. Starassner, E. Gerster *et al.*. Thermal management of optically pumped long-wavelength InP-based semiconductor disk lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(5): 1126~1134
- 9 A. J. Kemp, G. J. Valentine, John-Mark Hopkins *et al.*. Thermal management in vertical-external-cavity surface-emitting lasers: finite-element analysis of a heatspreader approach [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(2): 148~155
- 10 Dai Teli, Liang Yiping, Luo Yujing. 1000 W continuous laser diode planar array and the silicon micro-channel cooling module [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5): 585~589
戴特力, 梁一平, 罗於静. 千瓦级连续激光二极管面阵及微通道冷却组件[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 585~589
- 11 Dai Teli. The thermal resistance and its measurement of a modular micro-channel cooler [J]. *Chinese J. Lasers B*, 2000, **9**(4): 330~336
- 12 M. Kuznetsov, F. Hakimi, R. Sprague *et al.*. Design and characteristics of high-power (>0.5 W CW) diode-pumped vertical external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(3): 561~573
- 13 U. Keller, A. C. Tropper. Passively modelocked surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Physics Reports*, 2006, **429**(2): 67~120
- 14 Ana-Maria Bianchi *et al.*. Transferts Thermiques [M]. Wang Xiaodong Transl. Dalian: Press of Dalian University of Technology, 2008
安娜·玛利亚·比安奇, 伊夫·福泰勒, 雅克琳娜·埃黛等. 传热学 [M]. 王晓东译. 大连: 大连理工大学出版社, 2008
- 15 Liu Jing. Heat Transfer at Dimension of Micrometer/Nanometer [M]. Beijing: Science Press, 2001
刘 静. 微米/纳米尺度传热学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001
- 16 M. N. Ozisik. Heat Transfer [M]. Yu Changming Transl. Beijing: Higher Education Press, 1984
M. N. 奥齐西克. 热传导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1984
- 17 Dai Teli. Diode Pumping Solid State Laser [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1993
戴特力. 半导体二极管泵浦固体激光器 [M]. 成都: 四川大学出版社, 1993